

Список использованных источников

1. Тутарова В.Д., Калитаев А.Н., Закирова Р.А. Математическое моделирование нагрева сляба в методической печи // Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова – С. 75.
2. Попов Е.В., Дружинин Г.М. Адаптация математической модели расчёта нагрева металла для АСУ на примере толкательной печи стана 2800 ОАО «Уральская Сталь» // Екатеринбург: УРФУ, 2015. – 264 с
3. Рихтмайер Р., Мортон К. Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
4. Алтыева М.Ч. Математическое моделирование процесса нагрева сляба, как компонент управления технологическим процессом // XIV Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Управление большими системами». – Липецк: ЛГТУ, 2015 – 10 с.
5. Дождиков В.И., Ганул А.О., Мордовкин Д.С. Оптимизация работы энерготехнологического комплекса нагрева металла перед прокаткой // Сталь. 2018. №2. С. 69-71.
6. Денисов М.А. Автоматизированное проектирование в Ansys и Компас-3D. Электронное издание. – Екатеринбург: УРФУ, 2015. – 264 с.
7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Metallurgia, 1990 – 239 с.

УДК 621.1:662

Т. Т. Огонбаев, А. М. Дубинин, В. Г. Тупоногов, С. А. Грицук

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАКТОРЕ КОНВЕРСИИ МЕТАНА РАВНОМЕРНЫМ ВВОДОМ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Аннотация

В целях повышения температуры в кольцевой реторте реактора для воздушной конверсии метана и, как следствие, уменьшения термодинамической вероятности проникновения сажи в поры катализатора, предложено организовать неполное горение исходной метановоздушной смеси в слое инертной засыпки с последующим равномерно распределенным боковым вводом продуктов в реакционную зону кольцевой реторты с катализатором. Повышение минимальной температуры в реакционном объеме с 790 °С до 930 °С достигнуто при подводе продуктов неполного горения метановоздушной смеси в кольцевую камеру с никелевым катализатором через перфорационные отверстия, равномерно распределенные по высоте нижней части внутренней реторты. Состав продуктов конверсии, полученных при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 0,25$, позволяет

использовать их в качестве защитных атмосфер в машиностроении, процессах прямого восстановления железной руды и термообработки изделий.

Ключевые слова: кольцевая реторта с перфорациями, катализатор, распределение температуры, электрические нагреватели, метан, воздух, состав продуктов конверсии.

Abstract

In order to increase the temperature in the ring retort of the reactor for air conversion of methane and, as a consequence, reduce the thermodynamic probability of soot penetration into the pores of the catalyst, it was proposed to organize incomplete combustion of the initial methane-air mixture in an inert bed followed by uniformly distributed lateral injection of products into the reaction zone of the ring retort with catalyst. The increase in the minimum temperature in the reaction volume from 790 °C to 930 °C was achieved by supplying the products of incomplete combustion of the methane-air mixture to the ring chamber with nickel catalyst through perforations evenly distributed over the height of the lower part of the inner retort. The composition of the conversion products obtained at an air consumption coefficient of $\alpha = 0.25$ allows use them as protective atmospheres in mechanical engineering, the processes of direct reduction of iron ore and heat treatment of products.

Key words: ring retort with perforation, the catalyst, temperature distribution, electric heaters, methane, air, composition of the conversion products.

Введение. Конверсия метана является одним из основных способов получения технологических атмосфер в металлургической отрасли, используемых для извлечения железа из руд методом прямого восстановления, в качестве защитных и науглероживающих атмосфер при термообработке деталей.

В промышленных эндотермических генераторах воздушной конверсии метана для исключения зауглероживания катализатора температура в реторте со слоем катализатора должна поддерживаться на уровне 950-1050 °C, когда реакция идет во внутренней диффузионной области. При этом достигается высокая скорость реакций и концентрация реагентов у поверхности катализатора близка к нулю, что исключает проникновение сажи в поры катализатора и его разрушение [1]. Уменьшение по какой-либо причине температуры катализатора не только снижает скорость реакции, но и переводит процесс в кинетическую область, когда происходит выравнивание концентрации реагентов у поверхности катализатора и вдали от нее с образованием сажи, как на поверхности, так и в порах катализатора [2]. Сажистые образования деактивируют катализатор, увеличивают гидравлическое сопротивление проточной части [3]. Снижение температуры ниже порога сажеобразования чаще всего имеет локальный характер и связано с температурной неравномерностью в слое катализатора по длине реакционного канала. В данной работе выполнены исследования выравнивания и повышения температуры в кольцевом канале реактора конверсии метана посредством равномерного распределения ввода газовой смеси.

Экспериментальные исследования. Исследования проводились на модернизированном эндотермическом генераторе ЭН-125, показанном на рис. 1. Измерения профиля температуры слоя катализатора в кольцевой реторте на генератор до модернизации показали его значительную неравномерность по высоте реторты (кривая 1 на рис. 2). При температуре обогреваемой стенки реторты 1050 °C температура в слое катализатора опускалась до 790 °C. При этом на высоте 0,2 м от нижнего торца реторты обнаружена (по газовому анализу)

сажа в количестве $1,6 \text{ г/м}^3$. Падение температуры в нижней части реторты могло происходить вследствие эндотермического эффекта реакции конверсии метана при сосредоточенном вводе метановоздушной смеси в слой катализатора через нижний торец кольцевой реторты.

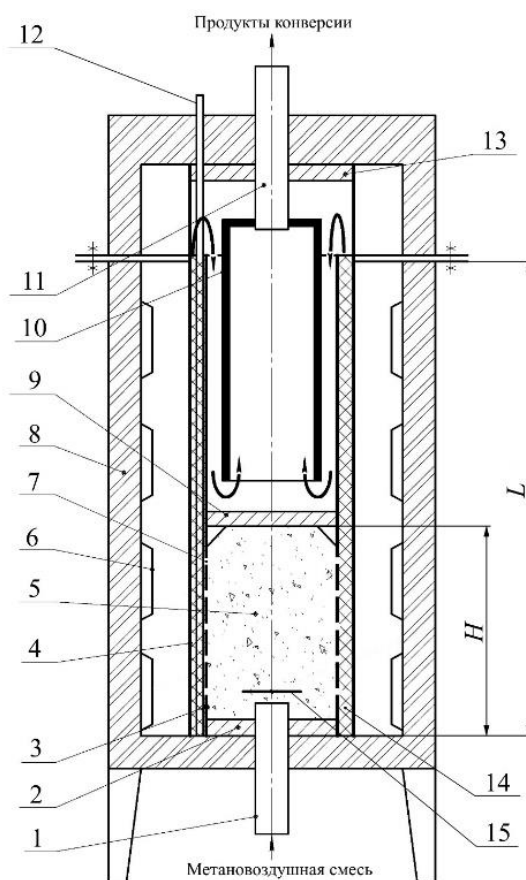


Рис. 1. Экспериментальный термохимический реактор:

- 1 – штуцер для ввода метановоздушной смеси; 2 – заглушка; 3 – внутренняя реторта с перфорациями; 4 – наружная реторта; 5 – инертная засыпка; 6 – электронагреватели; 7 – перфорации внутренней реторты; 8 – теплоизоляция; 9 – заглушка; 10 – рекуператор; 11 – штуцер для выхода продуктов конверсии; 12 – чехол для термопары; 13 – заглушка; 14 – слой катализатора; 15 – распределитель смеси

Для устранения температурной неравномерности была выполнена модернизация конструкции реактора, обеспечивающая боковой распределенный подвод метановоздушной смеси по высоте нижней части реторты. Кольцевая реторта высотой $L = 1,4 \text{ м}$, образована внутренней ретортой (3) с наружным диаметром $d_1 = 0,4 \text{ м}$ и наружной ретортой (4) с внутренним диаметром $d_2 = 0,45 \text{ м}$, помещена в теплоизолированный корпус (8) и обогревается снаружи электронагревателями (6). Кольцевой зазор шириной $\Delta = 25 \text{ мм}$ между внутренней и наружной ретортой образует реакционное пространство (14), заполненное никелевым катализатором КСН-2, имеющего форму полых цилиндров размером $18 \times 18 \times 4 \text{ мм}$. В нижней части цилиндрического пространства внутренней реторты выделена камера неполного сгорания

метановоздушной смеси высотой $H = 0,7$ м посредством установки нижней заглушки камеры (2) и верхней – (9). В нижнюю заглушку вмонтирован штуцер для подачи метановоздушной смеси (1) с распределителем смеси (15). Весь объем камеры сгорания заполнен инертной насадкой – шариками из огнеупорного кирпича (5). Для равномерного подвода продуктов частичного сжигания метана в кольцевой слой катализатора во внутренней реторте по всей высоте камеры выполнены отверстия (7) диаметром 9 мм в семи рядах по 6 отверстий в каждом. Продукты конверсии, выходящие через верхний открытый торец кольцевой реторты, попадают в укороченный при модернизации рекуператор (10), а затем через выходной штуцер (11) отводятся из генератора.

При проведении экспериментов в реактор подавалась смесь воздуха и метана с расходами 60,9 и 25,6 м³/ч соответственно. Расход продуктов конверсии составлял 125 м³/ч. Расходы измерялись ротаметрами. Температура стенки реторты поддерживалась на уровне 1050 °С регулятором температуры. Температура по высоте катализатора измерялась платина-платинородиевой термопарой, перемещаемой в чехле из легированной трубки – (12), заваренной с нижнего торца и размещенной в слое катализатора. Газовый анализ продуктов конверсии проводился на хроматографе.

Распределение температуры по высоте слоя катализатора показано на рис. 2, из которого видно, что температура на катализаторе не опускается ниже 920 °С и достаточно равномерна по высоте зоны ввода продуктов неполного сгорания.

Начиная с высоты $H = 0,7$ м и выше, массовый расход смеси в слое катализатора постоянен, и ее температура возрастает до температуры стенки обогреваемой реторты 1050 °С на выходе из слоя.

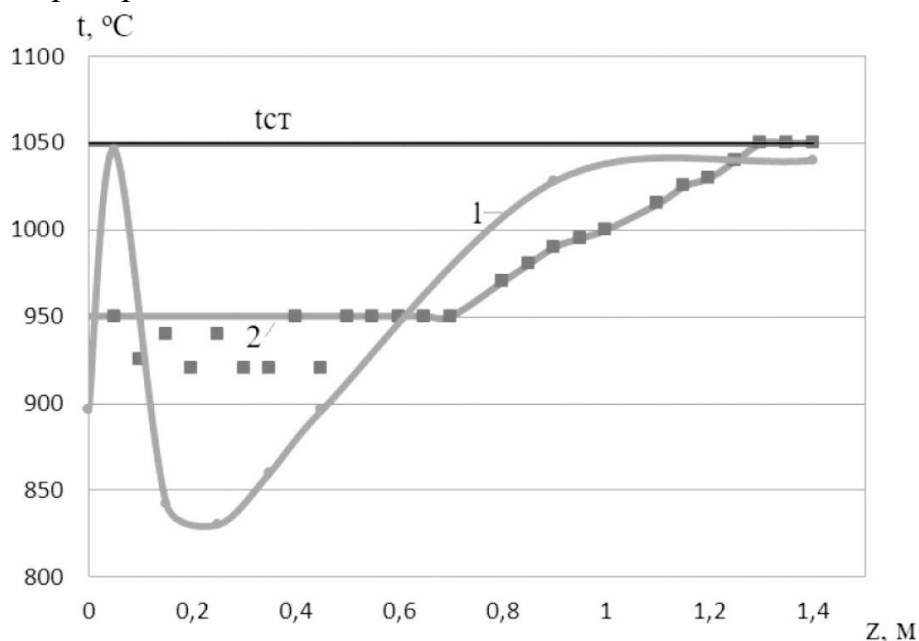


Рис. 2. Изменение температуры по высоте реторты:

- 1 – изменение температуры по высоте реторты z до модернизации;
- 2 – ■ экспериментальные значения температуры по высоте реторты после модернизации, $t_{ст}$ – температура стенки реторты

Состав полученных в экспериментах продуктов конверсии представлены в таблице. Выделение сажи в реторте не обнаружено.

Таблица

Экспериментальные концентрации компонентов на выходе из реактора

Компоненты смеси	CH ₄	H ₂ O	H ₂	CO	CO ₂	N ₂
Концентрации, %	0,32	0,23	39,18	20,6	0,17	39,5

Заключение. Разработан и экспериментально проверен рациональный способ равномерного ввода продуктов неполного горения метановоздушной смеси в кольцевую реторту реактора с катализатором через перфорационные отверстия в нижней части внутренней реторты. Неравномерность температуры по высоте катализатора уменьшается, а уровень минимальной температуры повышается с 790 °С до 930 °С, что позволяет устранить проникновение углерода в поры катализатора при соотношении $\text{CH}_4/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}) \approx 1$ и увеличить срок использования катализатора. Состав продуктов конверсии метана на выходе соответствует требованиям, предъявляемым к технологическим атмосферам.

Список использованных источников

1. Зельдович Я.Б. К теории реакции на пористом или порошкообразном материале // Журнал физической химии. 1939. Т. XIII. Вып. 2. С. 163-168.
2. Karakaya C., Kee R.J. Progress in the direct catalytic conversion of methane to fuels and chemicals // Progress in Energy and Combustion Science, 55 (2016), pp. 60-97.
3. Estephane J., Aouad S., Hany S., Khoury B.El., Gennequin C., Zakhem H.El., Nakat J.El., Aboukais A., Aad E.A. CO₂ reforming of methane over Ni-Co/ZSM5 catalysts. Aging and carbon deposition study // International Journal of Hydrogen Energy, 40 (2015), pp. 9201-9208.

УДК 004.94

П. А. Сеченов, В. П. Цымбал

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Россия

АНАЛИЗ ФАЗОВЫХ ТРАЕКТОРИЙ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КОЛОННОГО СТРУЙНО-ЭМУЛЬСИОННОГО РЕАКТОРА

Аннотация

В статье рассмотрено исследование на имитационной модели внутреннего механизма диссипативной структуры – гравитационный сепаратор в струйно-эмульсионном реакторе. Разработанные ранее математические модели, знания и опыт, полученные на крупномасштабной опытной установке Запсибметкомбината, позволили разработать